



プラントデータに基づく熱物質収支計算による火力 プラント性能解析手法の開発とその適用研究

著者	橋 徹
号	57
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4739号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61677

氏 名	たか はし とおる
授 与 学 位	高 橋 徹
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成25年3月27日
研究科、専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械システムデザイン工学専攻
指 導 教 員	プラントデータに基づく熱物質収支計算による火力プラント性能解析 手法の開発とその適用研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 湯上 浩雄
	主査 東北大学教授 湯上 浩雄 東北大学教授 小川 和洋
	東北大学教授 丸田 薫 東北大学教授 中田 俊彦
	東北大学准教授 井口 史匡

論文内容要旨

火力発電は、国内における系統電力の設備容量ならびに発電電力量の約6割を占めており（2010年度）、その負荷調整力の高さや使用できる燃料の多様性などの利便性からも、電力系統における重要な電源である。特に、2011年の震災による原子力問題以降、高い稼働率が続いており、また、太陽光発電等の再生可能エネルギー由来の発電電力の大量導入時において系統安定化対策に不可欠な電源であり、今後も極めて重要な役割を果たすと考える。しかしながら、貴重な化石燃料の消費、CO₂やSO_x、NO_xなどの排出が懸念される。したがって、火力発電プラントの熱効率の維持や向上は重要であり、また、電力を供給する側だけでなく、エネルギーを使用する需要側も含めたエネルギー需給システム全体でのエネルギー効率の向上もまた重要である。これらのためには、既存火力発電プラントの熱効率低下要因の解明や、新高効率システムの開発、さらにはシステムの特徴を捉えた上での新たな活用方策の検討が必要であり、これらを行う上で、システムの性能を適切に解析することは極めて重要である。しかしながら、既設火力発電プラントについては、熱効率管理に用いられている従来の入出熱法や損失法では全体の熱効率は把握できるものの、プラントを構成する機器の数が多いため、熱効率が低下した場合にその原因を特定することは困難である。また、エネルギー需給システムについては、その構成や運用方法、負荷形態は多種多様であり複雑であるため、幅広いシステム・条件に対して、エネルギー消費量やCO₂排出量の算出や、省エネ化や省CO₂化の検討を行うことは困難である。

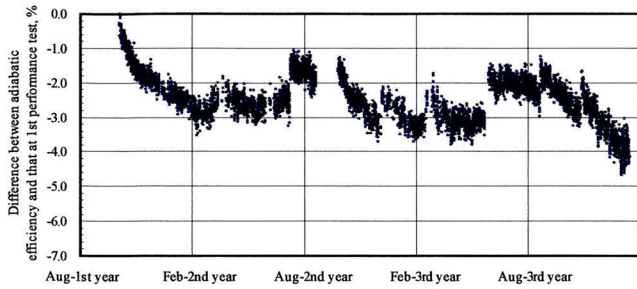
そこで、本論文では、エネルギー消費量ならびにCO₂排出量の増加抑制あるいは削減に寄与することを目的として、火力発電プラントに対する新たな性能解析手法を開発し、既存火力発電プラントの熱効率低下要因の解明や、新規開発高効率火力発電システムであるアドバンスド高湿分空気利用ガスタービン（Advanced humid air gas turbine: AHAT）システムの性能解析を行った。また、今後の電力需給の安定性向上および再生可能エネルギー導入促進のため電力貯蔵技術は重要であると考え、その一つとして圧縮空気貯蔵（Compressed Air Energy

Storage : CAES) ガスタービン発電システム (CAES システム) に着目し、AHAT システムと組み合わせた新たな高効率 CAES システムの検討を行った。さらに、多種多様なエネルギー需給システムにおけるエネルギー消費量や CO₂ 排出量を算出する手法を開発し、これを用いて系統電力需要端効率および CO₂ 排出原単位の影響評価を行った。

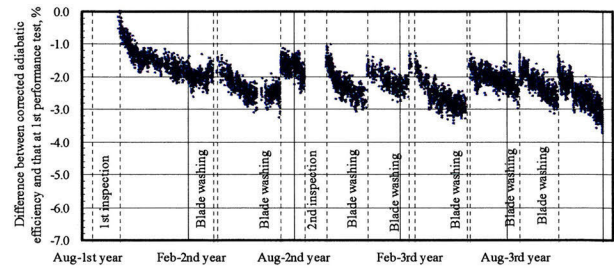
本論文は全 8 章より構成されており、第 1 章においては本論文の研究背景、目的及び現状での技術課題について述べている。

第 2 章では、火力発電システムの熱物質収支計算方法について述べ、その計算を様々なシステム構成および設定条件下で柔軟に行うことを可能とする解析アルゴリズムならびにツールを開発した。熱物質収支計算では、物質保存則ならびにエネルギー保存則に基づいてシステム全体での質量および熱量の収束計算が必要である。その方法として、圧力、流量と熱の各項目のバランス計算を機器モデル毎で行う方法が考えられるが、この方法の場合、各項目の条件設定箇所が同じである必要がある。種々の条件下で計算を行う場合には、これらの項目の条件設定箇所が異なることが多いため、この方法では充分でない。そこで、圧力、流量と熱量の各項目について、それぞれのバランス計算を行い、全てのバランスがとれるよう繰り返し計算を行うものとした。すなわち、圧力、流量と熱量とは、一つの変数、例えば熱量について収束計算を行う際には、他の変数、つまり圧力および流量は定数値を代入して計算し、一つの変数の収支計算が終了した時点で、他の変数を代入して再度計算するものとした。このアルゴリズムを適用し、物性値推算式ならびに各種機器の静特性モデルを組み込むことで、グラフィックユーザインターフェースを有する操作性の高いツールを開発した。その結果、ひとつのプログラムで、種々のシステム構成や設定条件下での発電システムの熱物質収支計算が、高い自由度をもって行えるようになった。

第 3 章では、火力発電プラントに対する新たな性能解析手法を開発した。この手法は、熱効率変化要因の特定、諸因子の熱効率への影響評価を行うために、プラントを構成する機器について個別にそれらの性能値を把握し、それら性能値や運転条件の変化が熱効率に与える影響を定量化するものである。機器個別の性能値を算出するためには、機器出入口作動流体状態量の計測値であるプラントデータを用いることが有効である。しかしながら、高温あるいは蒸気の湿りのために、計測が困難な場所あるいは状態量がある。そこで、プラントデータを活用して熱物質収支計算を行うことにより、計測できない部分のエンタルピーや温度などの状態量を算出し、それらにより各機器の性能値を算出することを可能とした。しかしながら、季節による大気条件変化などの機器出入口作動流体の状態変化によってその性能が大きく変化し、算出された値が機器そのものの性能を示すものではない場合がある (Fig. 1 (1))。そこで、本手法では、長期間のプラントデータから算出された多数の機器性能値に対し、機器入口作動流体のある状態量を独立変数とする機器性能関数を作成し、この関数の独立変数を標準条件の値とすることで機器性能を標準状態に換算でき、この外的要因の影響を排除した、機器そのものの性能変化を把握できるものとした (Fig. 1 (2))。



(1) Adiabatic efficiency of compressor

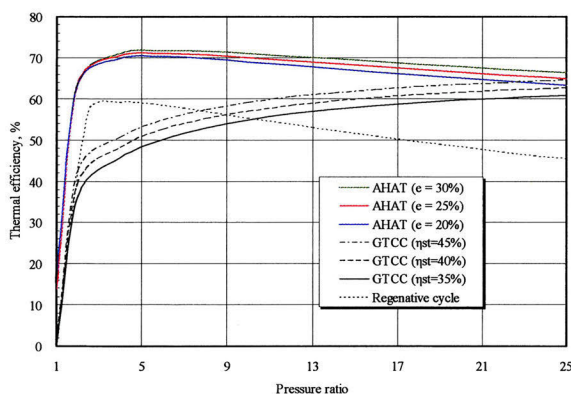


(2) The corrected adiabatic efficiency

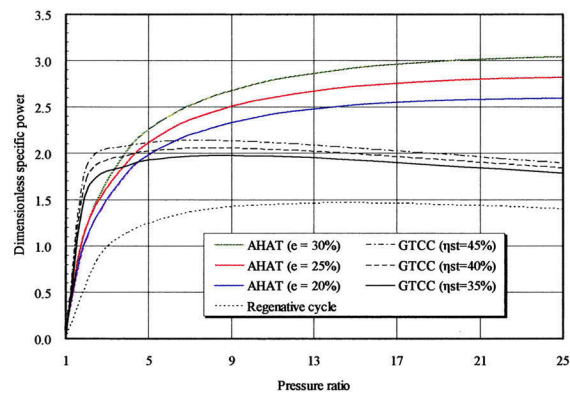
Fig. 1 Secular change of adiabatic efficiency and the corrected adiabatic efficiency of GT compressor

以上の方法で機器自体の性能変化を評価できるが、機器によって性能指標は異なっており、また、それぞれの機器性能値の変化が熱効率に与える影響は異なる。つまり、性能が最も大きく低下した機器が必ずしも熱効率の低下を招いている最大の原因とは限らない。そこで、本手法では、上記方法で得られた個々の機器性能値の変化が、熱効率に与える影響を定量化することにより熱効率低下の主要因を特定できるものとした。本手法を、商用運転を行っている汽力発電プラントとガスタービン複合発電プラント(GTCC)に適用し、熱効率低下の主要因子の特定を行うことができた。

第4章では、高効率でかつ運用性が高いことが期待できる AHAT システムについて、理論熱力学の観点から解析を行い、これまで十分に明らかにされていなかったその熱効率向上のメカニズムや理論特性を明らかにすることができた。また、理論熱効率式および理論無次元比出力式の導出を行い、これらの式から、GTCC や再生サイクルと比較して広い圧力比範囲で高い熱効率および無次元比出力が得られることを明らかにした (Fig. 2)。



(1) Thermal efficiency



(2) Dimensionless specific power

Fig. 2 Relationship between thermal efficiency, dimensionless specific power and pressure ratio in AHAT, GTCC and regenerative cycle

また、大気温度変化に対する熱効率の変化特性や部分負荷での熱効率に GTCC に比べて優位性があることを示した。さらに、他の高湿分空気利用ガスタービンシステムに比べて、AHAT は構成が簡素でありながら、遜色の無い高い熱効率を得られることを示した。

第5章では、このAHATシステムについて、3MW級検証機の運転試験を行い、その実機のプラントデータによる各種特性解析や性能解析を行った。その結果、実データからも大気温度上昇に伴う熱効率および出力の低下が、GTCCより小さいことを示すことができ、また、起動特性にもGTCCに比べて優位性があることを示した。また、第3章で開発した性能解析手法を適用して、加湿や熱回収などの熱効率への効果の定量評価や、計画熱効率と実際の熱効率の差異の原因究明、さらには経年的な機器性能の変化の熱効率に与える影響の定量評価を行った。これらにより、開発手法は、新規開発火力発電プラントの性能解析にも有効であることを示すことができた。

第6章では、前章までに得られたAHATシステムの特徴を元に、AHATシステムのCAESシステムへの適用性について検討した。AHATシステムは、圧縮機に水噴霧を行うことによる冷却効果で圧縮動力を低減でき、また、圧縮された空気に湿分を加えることによりGT作動流体の重量流量および比熱を増やことでタービン出力を増加できる。つまり、少ない圧縮動力で高いGT出力が得られる。また、再生熱交換器でGT排ガスからの熱回収量を増加させることにより高効率化を図れる。構造面からも、蒸気タービン系がないため構成が簡素であるだけでなく、海水冷却が必要ないため、GTCCに比べて設置場所選択の自由度が高い。したがって、AHATシステムはCAESの発電設備に有効であることがわかった。一方で、空気貯蔵設備の建設コスト低減のため、より圧力を高くし体積を小さくして貯蔵することが望ましく、既存CAESプラントでは5~8MPaと非常に高い圧力で貯蔵されている。そこで、AHAT-CAESシステムについて、そのトッピングにシンプルサイクルGTや再生サイクルGTなどを設置した各種システムについて熱効率解析を行い、既存あるいは既提案の高効率CAESシステムと比べた結果、高い熱効率を示し、特に再生サイクルGTと組み合わせたシステムで最も高い熱効率を得られることを示した。

第7章では、システム構成や運用方法、負荷形態などが多種多様なエネルギー需給システムに対して、一次エネルギー消費やCO₂排出量の算出を行うことのできるアルゴリズムを開発した。その手法の適用事例として、様々な負荷形態を持つ一般家庭に、高効率燃料電池、ヒートポンプ型給湯機、潜熱回収型高効率給湯器をそれぞれ導入した場合を想定し、一次エネルギー消費およびCO₂排出量の削減効果の定量比較を行い、また、系統電力の需要端効率向上およびCO₂排出原単位削減の効果を定量的に示すことができた。

第8章は本研究の総括であり第2章から第7章までに得られた結果を整理列記すると共に、開発した性能解析手法および提案システムの有効性を述べている。

論文審査結果の要旨

火力発電は、その利便性の高さから電源構成上重要である一方、化石燃料消費ならびに CO_2 、 SO_x や NO_x などの排出が懸念される。したがって、その熱効率向上や再生可能エネルギーの導入、供給側のみならず需要側も含めたエネルギー需給システム全体の効率向上は極めて重要である。そのためには、システムの性能を適切に解析し、効率低下要因の特定やシステム特性の解析が必要である。そこで、火力発電プラントに対する新たな性能解析手法ならびにエネルギー需給システムに対する解析手法を開発し、実機に適用した。本論文は、これらの研究成果を纏めたものであり、全編8章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、火力発電システムに対して、種々の構成や設定条件に対応可能な熱物質収支計算手法を開発している。これは、本研究の目的を達成するために、有効かつ重要な成果である。

第3章では、火力発電プラントに対して、外的条件変化の影響を排除した機器自体の性能変化を評価でき、さらに個々の変化が熱効率に与える影響を定量化する手法を開発している。これを商用汽力およびガスタービン複合発電プラント(GTCC)に適用し、熱効率低下要因の特定を実現している。これは、多数のプラントデータによる熱物質収支計算の適用によって初めて得られるもので、これまでになく有益な成果である。

第4章では、高効率が期待されるアドバンスト高温空気利用ガスタービン(AHAT)について、理論熱効率式と無次元比出力式を導出してその熱力学的特性ならびに GTCC や再生サイクルに比した優位性を明らかにしている。これらは、理論熱力学の観点による新たな知見であり、学問上ならびに実用上重要な成果である。

第5章では、AHAT 検証機のプラントデータを解析し、大気温度変化に対する特性や部分負荷特性、起動特性を得ている。また、3章で開発した手法により、加湿や熱回収などの熱効率に対する効果の定量評価や、経年的な熱効率変化要因の定量評価を行うことができることを示している。これらは、実用上重要な成果である。

第6章では、変動の激しい再生可能エネルギー導入促進のため圧縮空気貯蔵発電(CAES)システムに着目し、AHAT を用いた CAES システムの構成や最適作動条件を検討し、理論上高い熱効率が得られている。これは、これまでになく重要な成果である。

第7章では、システム構成、運用方法、負荷形態などが多種多様なエネルギー需給システムに対して一次エネルギー消費や CO_2 排出量が算出できる新たな手法を開発し、その適用事例として、一般家庭への高効率機器の導入効果、系統電力の需要端効率向上や CO_2 排出原単位削減の効果を定量的に示している。これは、有効な成果ならびに知見である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、エネルギーシステムの性能や特性を適切に解析するための有用な手法ならびに知見を得たものであり、機械システムデザイン工学ならびに熱工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。